

유도 전동기의 빠른 센서리스 구동 재개 방법

강혜원, 김준석, 이준석
단국대학교

Fast Restart Method for Sensorless Operation of Induction Motors

Hye-Won Kang, Joon-Seok Kim, June-Seok Lee
Dankook University

ABSTRACT

본 논문은 빠른 구동 재개를 위해 잔류 역기전력을 이용한 단락 전류를 통해 유도 전동기의 위치 및 속도를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 전동기가 회전 중일 때 인버터의 동작이 중단되면, 구동 재개를 위해 회전자 속도와 위치 정보가 필요하다. 제안된 방법은 잔류 역기전력을 통해 단락 전류를 생성하고, 유도 전동기 단락 시 발생하는 전압-전류 방정식을 통해 단락 전류 벡터의 위치를 추정한다. 또한 두 번의 단락 전류를 이용하여 회전자의 속도를 추정하고, 최종적으로 회전자의 위치를 계산한다. 제안된 방법은 잔류 역기전력을 활용하여 전동기의 속도와 잔류 자속의 d축 위치를 추정하기 때문에, 추가적인 전력 주입이 필요하지 않으며 회전자의 역기전력이 완전히 소멸되기 전에 빠르게 구동을 재개할 수 있다. 제안된 기법의 유효성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

유도 전동기는 단순한 구조와 견고함, 높은 내구성을 지녀 산업용 기계, 가전제품 또는 철도 차량 등과 같이 많은 산업 분야에서 사용되고 있다. 하지만, 유도 전동기의 속도 제어를 위한 레졸버 및 엔코더의 사용은 시스템의 가격 및 부피를 증가시키며, 노이즈에 취약하다. 이러한 단점을 해소하기 위해 일부 응용 분야에서 센서리스 제어가 사용되고 있다.

유도 전동기가 고속에서 센서리스 제어로 구동될 때 인버터의 동작이 중단되면 회전자 속도와 위치를 알 수 없어 구동 재개 시에 과전류가 흐를 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위해 구동 재개 시 회전자 속도와 위치 추정이 필요하다. 기존에는 자속이 모두 사라진 이후 DC 주입^[1]을 통해 회전자 속도와 위치를 추정하는 방법이 주로 연구되었다. 하지만, DC 주입 방식은 정전 시와 같이 직류단 전력이 부족한 경우와 빠른 재기동을 요구하는 경우에 대해 취약하다. 이를 해결하기 위해 역기전력을 활용하는 영구자석 동기전동기의 구동 재개 방법^[2]을 유도 전동기에 활용할 수 있으나, 잔류 자속의 변화로 적용에 어려움이 있다. 본 논문에서는 유도 전동기의 자속 변화에 관한 가정을 적용하여 잔류 역기전력을 이용하고, 추가 전력 소모 없이 단락 전류 벡터를 통해 빠르게 회전자 속도와 위치를 찾는 구동 재개 방법을 제안한다.

2. 유도 전동기의 구동 재개 방법

2.1 유도 전동기의 잔류 자속

유도 전동기가 회전하고 있을 때 인버터 동작이 중단되는 경우, 유도 전동기의 위치 및 속도를 추정하기 위해 잔류 역기전력을 이용해야 한다. 잔류 역기전력은 유도 전동기의 제어 동안 형성되고 남은 회전자 잔류 자속 λ_r^e 에 의해 감소하는 형태로 나타난다. 인버터 동작 중단 직후 잔류 자속의 크기는 인버터 동작 동안 전류가 정상상태임을 가정하는 경우, 중단 시점 t_{off}^- 에 대해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{dr}^e(t_{off}^-) = L_m i_{ds}^e(t_{off}^-), \lambda_{qr}^e(t_{off}^-) = 0. \quad (1)$$

인버터 중단 이후에는 스위칭 소자의 개방에 따라 고정자에 전류가 흐르지 못하므로 회전자 전압 방정식에 의해 λ_r^e 은 식 (2)와 같이 변화한다.

$$\lambda_{dr}^e = \lambda_{dr}^e(t_{off}^-) e^{-\frac{t}{\tau_r}} = L_m i_{ds}^e(t_{off}^-) e^{-\frac{t}{\tau_r}}, \lambda_{qr}^e = 0. \quad (2)$$

여기서, τ_r 은 L_r/R_r 을 의미한다.

2.2 잔류 역기전력을 이용한 회전자 초기 속도 추정

인버터의 중단 및 스위칭 소자의 개방 이후, 잔류 역기전력이 남아있는 경우 영전압 벡터 인가 시 발생하는 단락전류를 통해 회전자 속도와 위치를 추정할 수 있다. 영전압 벡터를 인가한 경우, 동기 좌표계 전압 방정식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p\sigma L_s & -\omega\sigma L_s \\ \omega\sigma L_s & R_s + p\sigma L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \frac{L_m}{L_r} \begin{bmatrix} p & -\omega \\ \omega & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^e \\ \lambda_{qr}^e \end{bmatrix}. \quad (3)$$

잔류 자속은 τ_r 에 따라 변화함으로 짧은 단락 시 단락 전류에 의한 λ_r^e 의 변화량이 없다고 가정할 수 있다. 또한, 단락 기간이 $\sigma L_s/R_s$ 에 비해 매우 작다면 R_s 는 0으로 근사화 된다. 따라서 단락 전류 벡터 I_{sh} 는 식 (4)와 같이 나타난다. 이때, t_{fault} 는 인버터 중단 동안의 시간이고, T_{sh} 는 영전압 벡터 인가 시간이다.

$$I_{sh} = \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} = \frac{L_m^2 i_{ds}^e(t_{off}^-) e^{-\frac{1}{\tau_r} t_{fault}}}{\sigma L_r L_s} \begin{bmatrix} \cos(\omega T_{sh}) - e^{-\frac{1}{\tau_r} T_{sh}} \\ -\sin(\omega T_{sh}) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

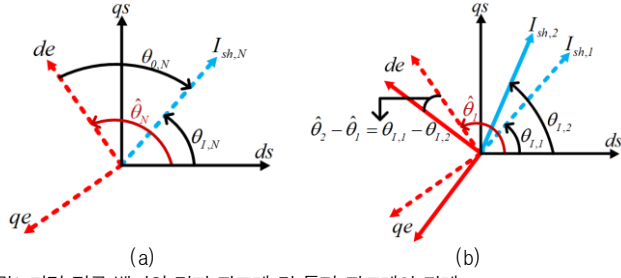


그림1 단락 전류 벡터와 정지 좌표계 및 동기 좌표계의 관계.
Fig.1 Relationship with short-circuit current vector in the stationary and synchronous reference frame.

초기 위치는 두 번의 영전압 벡터를 인가하여 유기된 두 I_{sh} 간의 관계를 이용하여 구할 수 있다. 그림 1은 두 단락 전류 벡터와 정지 좌표계 및 동기 좌표계와의 관계를 보여준다. 그림 1의 $\theta_{0,N}$ 는 동기 좌표계 d축 d_e 로부터 N 번째 $I_{sh,N}$ 와의 위치이고, $\hat{\theta}_N$ 는 정지 좌표계 d축 d_s 로부터 N 번째 단락 시 회전자 추정 위치이며, $\theta_{1,N}$ 은 d_s 로부터 $I_{sh,N}$ 의 위치로 식 (5)과 같이 나타난다.

$$\theta_{1,N} = \tan^{-1} \left(\frac{i_{qs}^s}{i_{ds}^s} \right). \quad (5)$$

두 단락 전류 벡터 사이의 시간 간격 τ 와 T_{sh} 를 이용하면 회전자의 추정속도 $\hat{\omega}$ 는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\hat{\omega} = \frac{\theta_{1,1} - \theta_{1,2}}{T_{sh} + \tau}. \quad (6)$$

2.3 회전자 초기 위치 추정

$\hat{\theta}_{0,N}$ 는 동기 좌표계 d축 d_e 로부터 N 번째 $I_{sh,N}$ 와의 추정 위치로 추정 속도 $\hat{\omega}$ 를 알 때, 식 (4)을 기반으로 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\hat{\theta}_{0,N} = \tan^{-1} \left(\frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{-\sin(\hat{\omega}T_{sh})}{\cos(\hat{\omega}T_{sh}) - e^{-\frac{1}{\tau_r}T_{sh}}} \right). \quad (7)$$

식 (5)을 통해 $\theta_{1,2}$ 을 계산하고, 식 (7)을 통해 $\hat{\theta}_{0,2}$ 을 알면 다음과 같이 $\hat{\theta}_N$ 을 계산할 수 있다.

$$\hat{\theta}_N = \theta_{1,2} - \hat{\theta}_{0,2}. \quad (8)$$

3. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 유도 전동기의 센서리스 구동재개 방법을 검증하기 위해 표 1의 파라미터와 PSIM 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 2는 제안하는 구동 재개 방법을 용한 1200[rpm] 일정속도 부하에서의 시뮬레이션 결과이다. 3.26[rpm]의 속도 오차와 4.89m[rad/s]의 위치 오차를 가진다. 인버터 중단 이후 재기동까지의 시간은 단락 시간에 따라 변화하지만 일반적으로 0.1[sec] 이내에 속도와 위치를 찾아 재기동을 할 수 있으며, 인버터 중단 이후에도 잔류 자속이 존재하여 정격 자속까지의 d축 자화 시간을 저감할 수 있다.

표 1 시뮬레이션에서 사용한 유도 전동기 파라미터.

Table 1 IM parameter for simulation.

R_s	0.5767 [Ω]	L_m	207.939 [mH]
R_r	0.4902 [Ω]	L_{ls}	27.061 [mH]
Pole	4	L_{lr}	27.061 [mH]

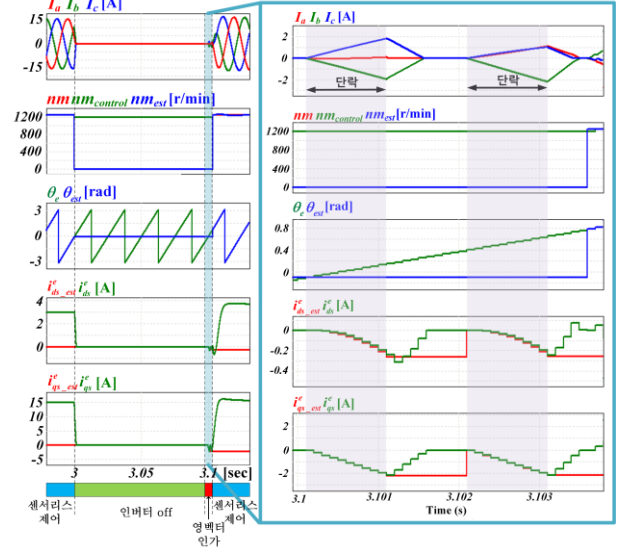


그림2 제안 방법을 적용한 유도 전동기 구동 재개 시뮬레이션.

Fig.2 Simulation of restarting operation with short-circuit current vectors.

4. 결론

본 논문에서는 잔류 역기전력을 이용한 유도 전동기의 빠른 센서리스 구동재개 방법을 제안한다. 인버터 중단 이후 잔류 역기전력을 통해 동기 좌표계의 단락 전류 벡터를 계산하고, 단락 전류 벡터와 동기 좌표계 d축과의 관계를 통해 회전자의 위치 및 속도를 추정한다. 제안하는 방법은 잔류 역기전력을 이용하기 때문에 추가적인 전력이 소모되지 않고 빠른 재기동이 가능하며, 구동 재개 시 잔류 자속이 남아있기 때문에 정격 자속까지의 d축 자화 시간을 감소시킬 수 있다. 제안 방법의 유효성은 일정속도 부하의 유도전동기 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 실적은 단국대학교 융합모빌리티연구소 소속 학부생 연구원이 참여하여 이룩한 연구성과물로서 해당 연구소는 2024년도 단국대학교 대학혁신지원사업 학부생 연구트랙제 사업의 지원을 받았음(2024대학혁신-027)

참고 문헌

- [1] S. Yin et al., "Fast Restarting of Free-Running Induction Motors Under Speed-Sensorless Vector Control," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 7, pp. 6124-6134, July 2020.
- [2] 길도영, 김준석, 이준희, 이준석.(2024).철도차량용 IPMSM의 전속도 영역 센서리스 제어를 위한 구동 재개 알고리즘.전력전자학회 학술대회 논문집,7-9.